

基于 HJ-1A/1B CCD 时间序列影像的水稻生育期监测

杨浩¹, 黄文江^{1*}, 王纪华¹, 杨贵军¹, 屠乃美², 杨小冬¹, 王大成¹

(1. 北京农业信息技术研究中心, 北京 100097; 2. 湖南农业大学, 长沙 410128)

摘要: 为了准确获得作物大面积生育期信息, 指导农业生产管理和决策, 基于 2009、2010 年湖南双季稻生育期间 42 景晴空 HJ-1A/1B CCD 影像, 提出了一种基于小波分析的生育期估计方法: 首先通过线性插值构建像元尺度上逐日的增强植被指数时间序列集, 随后采用小波分析对其进行去噪重建, 得到反映水稻生长过程的日时间序列曲线, 最后通过曲线特征估计水稻的关键生育期。以抽穗期为例, 利用湖南沅江市 20 个田块实地调查数据对估计结果进行了验证, 并与基于非对称高斯函数及基于 Savitzky-Golay 滤波的方法进行了对比, 结果表明基于小波分析的方法平均误差为 3 d 左右, 整体上不高于后 2 种方法误差, 能较精确地估计双季稻抽穗期, 提供了一种新的有效监测水稻生育期信息的方法。

关键词: 作物, 生长, 时间序列分析, 水稻, 生育期, HJ-1A/1B CCD, 小波分析

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.04.038

中图分类号: S127, TP75

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-04-0219-06

杨浩, 黄文江, 王纪华, 等. 基于 HJ-1A/1B CCD 时间序列影像的水稻生育期监测[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 219-224.

Yang Hao, Huang Wenjiang, Wang Jihua, et al. Monitoring rice growth stages based on time series HJ-1A/1B CCD images [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 219-224. (in Chinese with English abstract)

0 引言

准确掌握作物生育期是制定作物栽培管理措施的重要依据。农业生产中迫切需求及时、大面积监测作物生长情况, 指导农业科学肥水管理, 如及时监测水稻抽穗时间, 提前引导农户制定相应预防措施, 将极大避免因低温等灾害引起的损失。遥感具有大范围、快速、客观等特点, 为及时获取生育期信息提供了有利条件。

目前农作物物候期的监测一般基于时间序列数据的处理和分析, 这些方法根据重建方式的不同, 大致可以分为两类^[1]: 1) 基于信号处理的频域分析方法, 代表性方法包括快速傅里叶变换法^[2]和小波变换法^[3]; 2) 基于统计模型的分时段重建方法, 代表性方法为最小二乘滑动拟合法 (Savitzky-Golay)^[4-5]、最佳指数斜率提取法 (BISE)^[6]、非对称高斯模型拟合法 (Asymmetric Gaussian)^[7]和双逻辑斯蒂函数拟合法 (Double logistic function)^[8]。最典型的有 Jönsson 等基于 8 km 空间分辨率、10 d 合成的 NOAA/AVHRR 归一化植被指数 (NDVI) 时间序列产品, 利用不对称高斯函数提取非洲植被的物候信息^[7]; Jin Chen 等采用 1 km 分辨率 10 d 最大值合成的 SPOT/VEGETATION NDVI 产品, 提出利用 Savitzky-Golay 滤波方法, 并与 BISE

方法和傅立叶方法进行了比较^[4]; Sakamoto 等先后采用 500、250 m 分辨率的 Terra/MODIS 产品, 利用小波变换对时序数据进行重构, 认为小波变换总体上要优于傅立叶变换^[3,9]。以往研究都集中于较大尺度的监测, 采用的数据空间分辨率精度都低于 250 m, 缺少对分辨率较高、较小尺度上的研究, 对于南方零碎地块的监测有很大局限性。2008 年中国发射的 HJ-1 空间分辨率为 30 m, A/B 星座协同使重访周期缩短为 2 d, 此空间和时间分辨率为动态连续监测田块尺度的作物生长提供了可能。

本文获取了 2009、2010 年湖南双季稻生长期内 42 景 HJ-1A/1B CCD 影像, 构建了像元尺度上以 1 d 为间隔的增强植被指数 (EVI) 时间序列集, 利用小波分析对其进行去噪重建, 估计关键生育期。并以抽穗期为例, 结合湖南沅江市双季稻区 20 个地块的地面调查数据, 对结果进行了验证, 并与国际上普遍采用的非对称高斯函数拟合法和 Savitzky-Golay 滤波法 (S-G 方法) 进行了比较。

1 研究区和数据

1.1 研究区域

沅江市位于湖南省东北部, 洞庭湖西南, 112°14'37"~112°56'20" E, 28°42'26"~29°11'17" N, 沅湘、资、沅、澧四水。总面积 2177 km², 其中耕地 626 km², 湖洲 600 km², 水面 540 km², 丘岗 140 km², 呈“三分垌田三分洲, 三分水面一分丘”的湖乡特征。该地区地势平坦, 水稻种植以双季稻为主, 是进行本研究的理想区域。

1.2 遥感数据

湖南地区双季稻最早从 3 月下旬开始早稻播种, 最晚 11 月下旬晚稻成熟收获, 本研究获取了沅江市周围地

收稿日期: 2011-01-04 修订日期: 2011-03-27

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (40901173)、面上基金项目 (41071276), 公益性行业科研专项 (200803037)

作者简介: 杨浩 (1983-), 男, 湖北人, 现主要从事农业遥感应用研究。北京 北京农业信息技术研究中心, 北京 100097。

Email: younghow@163.com

*通信作者: 黄文江 (1974-), 男, 安徽人, 博士, 研究员, 现主要从事病虫害遥感等农业定量遥感研究。北京 北京农业信息技术研究中心, 100097。Email: huangwj@nercita.org.cn

区 2009、2010 年双季稻生育期内晴空条件的 HJ-1A/1B CCD 遥感影像 (表 1、表 2)，其空间分辨率 30 m，幅宽 360 km，4 个波段的光谱范围为 0.43~0.52、0.52~0.60、0.63~0.69、0.76~0.90 μm。从表 1 和表 2 中可看出，该区域每月约能保证 3 景晴空影像，可满足本研究连续性和动态性观测的需要。

不同于先前研究中时间序列数据源直接为产品数据

(如 MODIS、SPOT VEGETATION 产品等)，目前环境星数据还未形成产品。因此首先对 42 景影像采用遥感图像处理软件 ENVI 4.7 进行了预处理，包括辐射定标、大气校正以及几何校正等预处理，目的在于去除传感器响应、大气传输等影响，将 CCD 影像各波段的 DN 值转换为地物反射率，并保证所有影像各像元与对应的地物地理位置一致。

表 1 2009 年晴空 HJ-1A/1B CCD 影像
Table 1 Cloudless HJ-1A/1B CCD images in 2009

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
日期	03-07	04-07	04-15	04-25	04-26	05-04	05-22	06-06	06-14	07-07	07-09	07-13	07-17	07-23	08-19	08-27	09-06	10-01	10-05	10-15	10-24	11-05
儒略日	66	97	105	115	116	124	142	157	165	188	190	194	198	204	231	239	249	274	278	288	297	309
传感器	B-2	B-2	B-1	A-1	B-2	B-2	A-1	A-2	A-2	B-2	B-2	B-2	A-1	A-2	A-1	B-1	A-1	A-1	A-1	B-1	A-2	A-1

注：传感器 A-1、A-2、B-1、B-2 表示 HJ-1A CCD1、CCD2、HJ-1B CCD1、CCD2

表 2 2010 年晴空 HJ-1A/1B CCD 影像
Table 2 Cloudless HJ-1A/1B CCD images in 2010

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
日期	03-19	04-08	04-23	04-27	05-24	06-30	07-08	07-16	07-22	07-28	07-30	08-11	08-22	09-17	09-19	10-04	10-08	10-22	10-24	11-01
儒略日	78	98	113	117	144	181	189	197	203	209	211	223	234	260	262	277	281	295	297	305
传感器	B-2	B-1	B-2	B-2	B-2	A-2	A-2	A-2	B-1	A-1	B-1	B-1	B-2	A-1	B-1	B-2	B-2	A-1	B-1	B-1

注：传感器 A-1、A-2、B-1、B-2 同表 1

1.3 地面数据

在研究区域选择均匀分布且具有代表性的 20 个双季稻田块。考虑到该地区人均耕地少、地块零碎、品种多样、种植管理措施不一的复杂情况。选择水稻集中连片种植面积在 2 hm² 以上且地势平坦的田块，并要求为当地主栽品种，长势较为均匀。在田块中央选择观测调查点，确保该点处调查样本在周围区域具有代表性，远离建筑物、树木、河流、道路等其他地物至少 30 m。在调查点处采用 Trimble GeoXH GPS 进行亚米级高精度定位，在双季稻的关键生育期赴实地调查获取相关生育期和农学参数。

2 研究方法

基于南方地区 HJ 星覆盖的特点，提出了一种基于小波分析的生育期估计方法。首先构建像元尺度上 EVI 时间序列集，并采用小波分析对时间序列集进行去噪重建，得到反映水稻生长的日时间序列曲线，进而通过曲线特征位置估计水稻的关键生育期。

2.1 植被指数生成

EVI 与叶面积指数 (LAI) 线性相关，且在高生物量区间比 NDVI 更敏感^[10]。因其具有较大动态范围，用来评估水稻生长过程。此外，当湿度较高时 EVI 比 NDVI 更为有效。而研究区处于南方阴雨天气区，湿度较高，所以 EVI 更合适^[3,11]。

$$EVI = 2.5 \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + 6\rho_{Red} - 7.5\rho_{Blue} + 1} \quad (1)$$

式中， ρ_{NIR} 为近红外波段地表反射率； ρ_{Red} 为红波段地表反射率； ρ_{Blue} 为蓝波段地表反射率。

2.2 逐日 EVI 时间序列集构建

将上述每年的 EVI 图像按照时间顺序进行叠加，生

成各像元的 EVI 时间序列集。传统时间序列分析算法主要面向等时间间隔数据集，如等时间间隔的 MODIS、SPOT VEGETATION^[12]、MERIS^[5]、NOAA/AVHRR^[13] 等数据产品，由于阴雨天气、云覆盖等因素影响，此处生成基于晴空影像的时间序列集显然非等时间间隔。因此首先通过线性插值，进行时间维的初始扩展，得到以天为单位等间隔的 EVI 时间序列集。如图 1 为其中 08# 典型地块 2010 年 EVI 日时间序列曲线，由晴空时的影像 EVI 值 (观测值) 和通过插值得到的 EVI 值 (估计值) 组成。

2.3 时间序列去噪

由于作物生长连续而缓慢，理论上 EVI 时间序列应为平滑规则曲线。而实际上，观测值存在由于云污染、观测角度、传感器本身、大气条件等导致的噪声，会造成 EVI 值的偏差；估计值仅为简单的初始估计，有待修正。这二者导致生成的日 EVI 时间序列不规则 (图 1)。

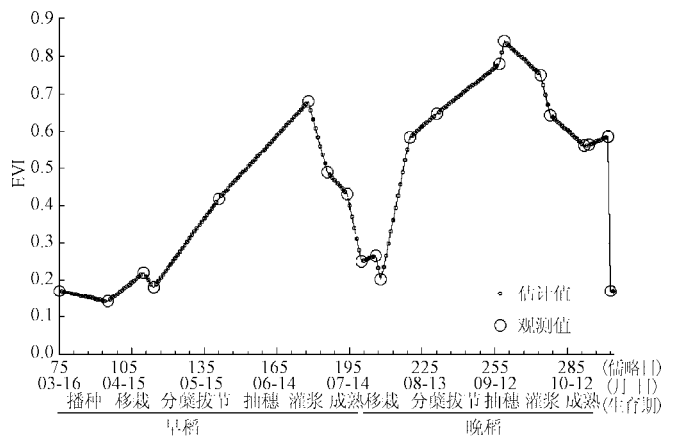


图 1 2010 年 08# 地块 EVI 时间序列
Fig.1 EVI time series at parcel 08# in 2010

由于小波分析具备良好的时频局部化能力和多尺度分析功能,能够在不同的分解层上有效地区分信号的突变部分和噪声^[14],本文引入了小波分析方法对不规则的时间序列集进行去噪重建。

EVI 曲线可以表示为

$$d(t_i) = f(t_i) + \sigma z, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中, $d(t_i)$ 为受噪声影响的 EVI 曲线; $f(t_i)$ 为真实 EVI 曲线; z 为噪声; σ 为噪声级别; t_i 为时间, 单位 d; n 为样本数量。对 $d(t_i)$ 进行去噪, 即消除其中的噪声部分 z , 获得 $f(t_i)$ 的估值 $\hat{f}(t_i)$, 使其均方误差 (MSE, mean squared error) 最小, 达到去除噪声的目的。

$$MSE(\hat{f}) = n^{-1} \sum_{i=1}^n (\hat{f}(t_i) - f(t_i))^2 \quad (3)$$

基于阈值的去噪算法分为 3 步:

1) 选择小波基和小波分解的层数, 对 d 进行离散小波变换:

$$Y(d) = Y(f) + Y(z) \quad (4)$$

式中, $Y(d)$ 、 $Y(f)$ 、 $Y(z)$ 为含噪曲线、真实曲线、噪声的小波变换高频系数。

2) 对每层高频系数选择一个阈值, 利用该阈值对小波变换系数进行运算, 获得 $Y(f)$ 的估值 $\hat{Y}(f)$ 。可采取软阈值和硬阈值 2 类, 如 (5) (6) 式, 式中 T 为阈值。

软阈值为:

$$\hat{Y}(f) = \begin{cases} \text{sgn}(Y(d))(Y(d)-T) & |Y(d)| \geq T \\ 0 & |Y(d)| < T \end{cases} \quad (5)$$

硬阈值为:

$$\hat{Y}(f) = \begin{cases} Y(d) & |Y(d)| \geq T \\ 0 & |Y(d)| < T \end{cases} \quad (6)$$

3) 对 $\hat{Y}(f)$ 行小波重构, 得到真实曲线的估计值 $\hat{f}(t)$:

$$\hat{f}(t) = \omega^{-1} \hat{Y}(f) \quad (7)$$

式中, ω^{-1} 为小波逆变换算子。

该方法关键在于阈值方案的选择, 常用的阈值选择方案有 Rigrsure, Sqtwolog, Heursure 和 Minimaxi 4 种^[14]。其中, Rigrsure 是一种基于 Stein 无偏似然估计原理的自适应阈值选择, Sqtwolog 采用固定的阈值 $\sqrt{2 \times \log(\text{length}(x))}$, Heursure 是前 2 种阈值的混合, Minimaxi 采用的是一种非理想情况下的均方误差极值作为阈值。

去噪效果也受阈值调整的方式的影响, 即在处理过程中阈值是否随噪声水平的变化而调整。若调整, 其方式有 2 种: 根据第一层小波分解的噪声水平估计进行调整; 根据每一层小波分解的噪声水平估计进行调整。

2.4 生育期提取

水稻生育期包括: 播种、移栽、分蘖、孕穗、抽穗、灌浆和成熟等。水稻一生的生长变化将反映到 EVI 随时间变化的曲线中。因此, 可通过建立 EVI 时间序列曲线上特征点与关键生育期的关系来估计某像元处田块的关

键生育期, 诸如:

1) 播种期: 水稻播种前一般会进行犁田和灌水, 导致 EVI 降低, 接着 EVI 水稻开始生长而变大。因此, 提取去噪后平滑曲线的极小值, 且对应日期小于抽穗日期时 (2 阶导数由负变正), 定义为水稻的播种期;

2) 抽穗期: 在水稻的生长周期中, 因为抽穗期是水稻从营养生长阶段到生殖生长的转折阶段, 最大 EVI 值出现在抽穗期附近^[10]。故可将每生长周期中 EVI 达到最大值时 (1 阶导数为 0) 的日期估计为该处水稻抽穗日期;

3) 收获期: 水稻抽穗后, 由于稻叶开始变黄萎缩, EVI 渐渐变小, 收割时 EVI 突然降低。因此提取去噪后平滑曲线的极小值, 且对应日期大于抽穗日期时 (2 阶导数由正变负), 视为水稻的收获期。

3 结果与分析

以抽穗期为例, 将研究区域 2 a 共 20 个早晚稻地块的实地调查抽穗日期与对应的估计抽穗日期进行了对比验证。此外, 在进行时间序列去噪时, 还与国际上普遍认可的 2 种算法 (非对称性高斯函数拟合法和 Savitzky-Golay 滤波法^[13]) 进行了结果对比。

3.1 参数选择

在双季稻处于抽穗阶段时赴田间实地调查, 根据农学专家知识结合田间实况判断田块的抽穗日期。由于 GPS 定位点选在田块中央, 且调查田块面积较大, 在计算其 EVI 时, 用定位点所在像元周围 4×4 邻域的 EVI 值取平均作为该像元处的 EVI, 目的在于克服几何校正误差影响等, 在利用光谱信息和时间序列信息的同时也充分利用空间邻域信息。

本文算法在 Matlab 平台中设计开发。在使用小波方法进行时间序列去噪时, 试验了 3 种类型的小波基 (Daubechies, Coiflet, Symlet), 4 种常用的阈值方案 (Rigrsure, Sqtwolog, Heursure, Minimaxi)。通过选择不同的参数组合, 对比试验结果, 发现对于任意 1 a 的双季稻日时间序列曲线, 使用 Daubechies20-45 小波基对其进行 5 层分解, 采用软阈值函数处理小波变换系数并使用 Heursure 阈值方案进行阈值估计, 然后根据每一层小波分解的噪声水平估计进行阈值调整可以得到较好的效果, 在去除奇异噪声的同时, 得到较平滑的保留生长特征的曲线。

对于非对称高斯方法和 S-G 方法采用 TIMESAT^[15] 工具包。同样针对原始时间序列数据不等间隔的特点, 先插值构建日时间序列 EVI, 并对得到的每天的 EVI 点赋予 0~1 之间的权重。EVI 观测值的权重定为 1, 插值得到的 EVI 估计值的权重则小于 1, 大小设定为距两端观测值的距离 (天数) 的倒数, 距离越远, 权重越低。

3.2 生长过程模拟

图 2 为 08# 典型地块的 2009、2010 年 EVI 时间序列分别采用 3 种方法去噪重建后的结果。可以看到, 整条去噪重建后曲线呈双峰特征, EVI 随着时间先逐渐升高, 达到峰值后又逐渐降低, 这正好与每一季水稻群体的生

长状况相吻合：在播种至抽穗的营养生长阶段，水稻从幼小植株开始不断积累营养，各器官逐渐分化形成，群体在抽穗期附近是达到最大；在抽穗至成熟收割的生殖生长阶段，光合产物主要用于生殖器官的生长和充实，叶片逐步变黄、萎缩和凋零，群体变小直至收割。因此去噪重建的曲线较好地反映了双季稻 1 a 的生长。对比基于小波分析、基于非对称高斯函数和基于 S-G 滤波的 3 种方法，直观上去噪效果类似，但细节保持的方式有所不同。

3.3 抽穗期估计

表 3 给出了分别采用 3 种方法进行抽穗日期估计的结果和误差。表中估计值为 20 个地块采用相应方法得到的抽穗日期估计值进行平均后的结果，地面调查平均抽穗期亦为 20 个地块的实地调查抽穗日期进行平均后的结果。

对比 3 种方法估计结果误差，从表 3 可看出，2009

年早稻、2010 年晚稻采用基于小波分析的方法误差最小，分别为 2.3、1.9 d，2010 年早稻误差居中为 1.7 d，2009 年晚稻基于小波分析的方法误差比其他 2 种方法误差要大，但误差也仅为 3.4 d。

为了便于对比查看，将表 3 中估计结果的儒略日直接表示为日期形式，如表 4。对比研究区域早稻、晚稻在 2009、2010 年 2 a 间的抽穗日期变化，从表 4 中基于小波分析的结果可看到，相比 2009 年，2010 年早稻平均抽穗期滞后 8 d，晚稻滞后 10 d。而从实地调查的结果看，2010 年湖南洞庭湖地区双季稻遭遇大面积低温冷害天气，早稻和晚稻生育期普遍比 2009 年推迟 6~10 d，这与估计结果相符。从表 4 还可看出，采用另外 2 种方法结果差于基于小波分析的方法。因此基于小波分析的方法较好地反映出了实际生育期的推迟。

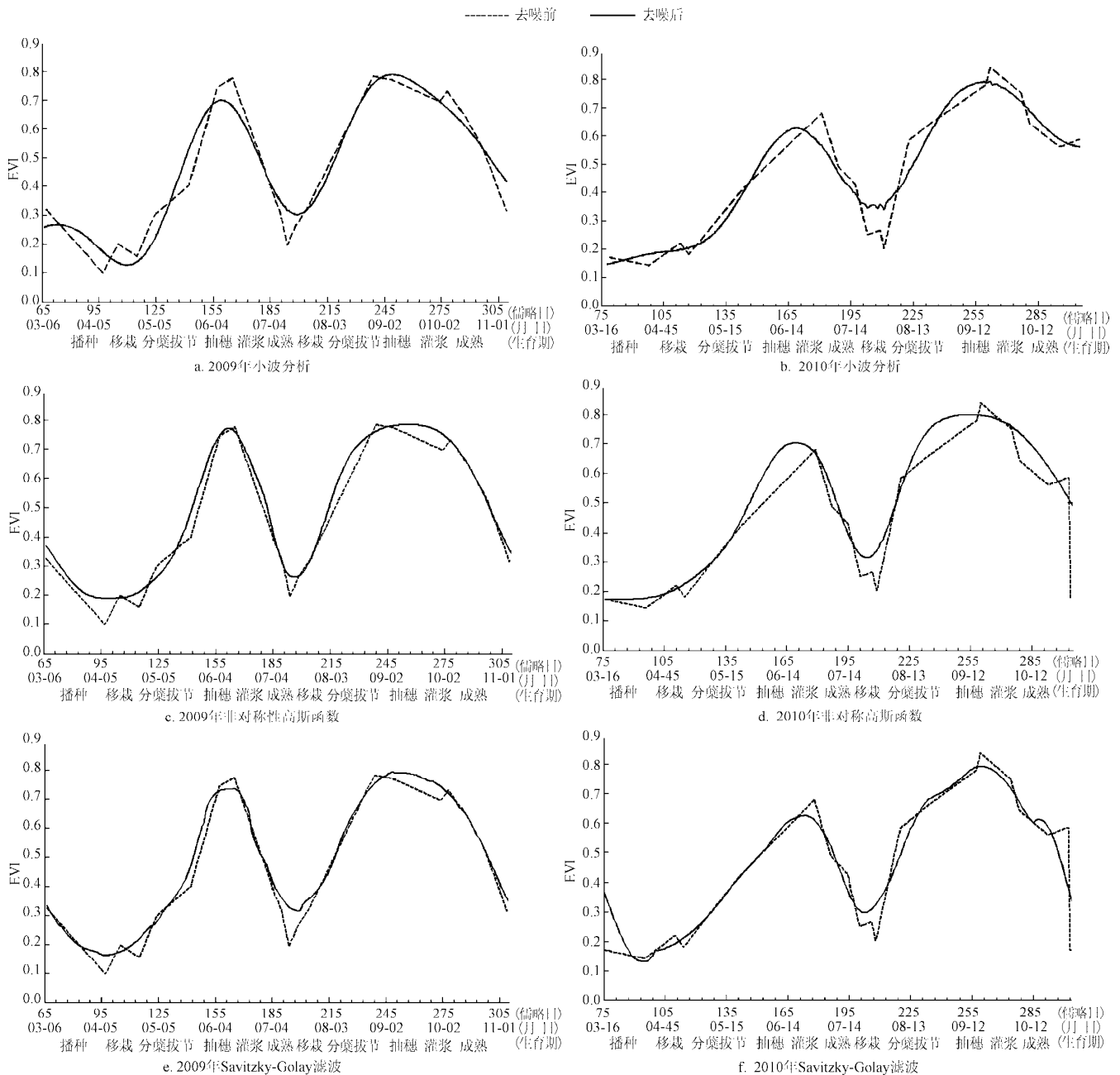


图 2 08#地块 2009、2010 年 EVI 去噪前后曲线

Fig.2 Noisy and denoising EVI curve at parcel 08# in 2009 and 2010

表 3 20 个地块抽穗期估计的平均值与误差
Table 3 Average result and error of heading date estimate for 20 parcels

类型	Wavelet 估计	Gaussian 估计	S-G 估计	实地调查抽穗期的平均值	Wavelet 误差	Gaussian 误差	S-G 误差
2009 年早稻	164.4	164.2	162.1	166.7	-2.3	-2.5	-4.6
2009 年晚稻	251.1	255.4	256.5	254.5	-3.4	0.9	2.0
2010 年早稻	172.4	171.9	173.9	174.1	-1.7	-2.2	-0.2
2010 年晚稻	261.0	258.6	259.7	262.9	-1.9	-4.3	-3.2

注: 表中日期为儒略日

表 4 20 个地块抽穗期估计的平均值两年结果对比
Table 4 Comparison of two year average heading date estimate for 20 parcels

类型	Wavelet 估计	Gaussian 估计	S-G 估计	实地调查抽穗期的平均值	类型	Wavelet 估计	Gaussian 估计	S-G 估计	实地调查抽穗期的平均值
2009 年早稻	6-13	6-13	6-11	6-16	2009 年晚稻	9-08	9-12	9-14	9-12
2010 年早稻	6-21	6-21	6-23	6-23	2010 年晚稻	9-18	9-16	9-17	9-20
差值	8	8	12	7	差值	10	4	3	8

4 结 论

通过实地调查数据结果验证和与国际上普遍认可的 2 种算法的对比, 可以得出以下结论:

1) 以 HJ-1A/1B CCD 时间序列影像为基础, 可有效监测南方双季稻生育期, 其中抽穗期估计的平均误差为 3 d 左右;

2) 去噪重建后的 EVI 曲线能较好地反映出双季稻随时间连续变化的生长过程, EVI 曲线达到峰值时可近似视为水稻进入抽穗期;

3) 与基于非对称性高斯函数和基于 S-G 滤波的方法相比, 基于小波分析方法的估计误差整体上不高于前者, 具有一定的优势。

此外得到的 EVI 时间序列曲线可为作物分类、种植模式识别、作物生长模型、数据同化等相关研究提供有意义的参考。但还有部分工作有待进一步开展, 如深入研究植被指数曲线与其它关键生育期的关系, 并在更大地域、更广范围、更多作物、更多地面实测点进行验证分析; 克服因关键数据缺失对曲线走向的影响, 与时间分辨率更高的数据如 MODIS 数据进行融合; 挖掘模式特征, 发展根据往年历史数据或者当年前期数据对关键生育期的预测方法等; 通过聚合等方法发展面向田块尺度的方法等。

[参 考 文 献]

- [1] 侯东, 潘耀忠, 张锦水, 等. 农区 MODIS 植被指数时间序列数据重建[J]. 农业工程学报, 2010, 26(增刊 1): 206—212.
Hou Dong, Pan Yaozhong, Zhang Jinshui, et al. Reconstruct MODIS vegetation index time-series data of cropping area[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(Supp.1): 206—212. (in Chinese with English abstract)
- [2] Roerink G J, Menenti M, Verhoef W, et al. Reconstructing cloud free NDVI composites using gournier analysis of time series[J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(9): 1911—1917.
- [3] Toshihiro Sakamoto, Masayuki Yokozawa, Hitoshi Toritani, et al. A crop phenology detection method using time-series MODIS data[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 96: 366—374.
- [4] Jin Chen, Per Jönsson, Masayuki Tamura, et al. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 91: 332—344.
- [5] Jihua Meng, Bingfang Wu, Qiangzi Li, et al. Monitoring Crop Phenology with MERIS Data: A Case Study of Winter Wheat in North China Plain[C]//Progress In Electromagnetics Research Symposium. Beijing, China, 2009, 1225—1228.
- [6] Viovy N., Arino O., Belward A. S., et al. The best index slope extraction (BISE): A method for reducing noise in NDVI time series[J]. International Journal of Remote Sensing, 1992, 13: 1585—1590.
- [7] Jönsson P, Eklundh L. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(8): 1824—1832.
- [8] Beck P, Atzberer C, Høgda K, et al. Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: A new method using MODIS NDVI[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 100: 321—334.
- [9] Toshihiro Sakamoto, Brian D. Wardlow, Anatoly A. Gitelson, et al. A Two-Step filtering approach for detecting maize and soybean phenology with time-series MODIS data[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114: 2146—2159.
- [10] Huete A, Didan K, Miura T, et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83, 195—213.
- [11] Dailiang Peng, Alfredo R. Huete, Jingfeng Huang, et al. Detection and estimation of mixed paddy rice cropping patterns with MODIS data[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2011, 13(1): 13—23.
- [12] 鹿琳琳, 郭华东. 基于 SPOT/VEGETATION 时间序列的冬小麦物候提取方法[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 174—179.

- Lu Linlin, Guo Huadong. Extraction method of winter wheat phenology from time series of SPOT/VEGETATION data[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(6): 174–179. (in Chinese with English abstract)
- [13] 吴文斌, 杨鹏, 唐华俊, 等. 两种 NDVI 时间序列数据拟合方法比较[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 183–188. Wu Wenbin, Yang Peng, Tang Huajun, et al. Comparison of two fitting methods of NDVI time series datasets[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 183–188. (in Chinese with English abstract)
- [14] 周丹, 王钦军, 田庆久, 等. 小波分析及其在高光谱噪声去除中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(7): 1941–1945. Zhou Dan, Wang Qinjun, Tian Qingjiu, et al. Wavelet analysis and its application in denoising the spectrum of hyperspectral image[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(7): 1941–1945. (in Chinese with English abstract)
- [15] Lars Eklundha, Per Jönsson. TIMESAT 3.0 Software Manual. 2010.

Monitoring rice growth stages based on time series HJ-1A/1B CCD images

Yang Hao¹, Huang Wenjiang^{1*}, Wang Jihua¹, Yang Guijun¹, Tu Naimei², Yang Xiaodong¹, Wang Dacheng¹

(1. Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China;

2. Hunan Agriculture University, Changsha 410128, China)

Abstract: Crop growth stages information in large-scale is crucial to guide the management and decision-making in agriculture production. In order to obtain a precise information, a wavelet-based method for estimating rice growth stages was proposed based on 42 cloudless HJ-1A/1B CCD images in Hunan's double cropping rice growth period in 2009 and 2010. Firstly, a time-series EVI dataset at day frequency at pixel scale was built by linear interpolation. Then a profile, which reflects the rice growth process, was produced by filtering based on wavelet analysis. At last, the critical growth stages could be estimated according to the characteristics of the curve. As an example, 20 parcels *in situ* investigation for rice heading date in Yuanjiang City were used to verify the results, and the wavelet-based method was compared to those based on non-symmetrical Gaussian function and Savitzky-Golay filtering. The result showed that the proposed method, with an average error of 3 days which was less than the latter's errors, could accurately monitor heading date of double cropping rice. This method is available in monitoring rice crop growth stages.

Key words: crops, growth, time series analysis, rice, growth stages, HJ-1A/1B CCD, wavelet analysis method